

ナノ構造付与切削工具のチタン合金に対する切削特性

千徳 英介* 峠 正範**

Cutting Properties of Tool with Nano-structured Surface against Titanium Alloy

Eisuke SENTOKU, Masanori TAO

Low thermal conductivity and high chemical reactivity of titanium alloys cause the tool life to shorten. One of the solutions of this problem is cutting by a coated tool has high thermal resistance and low reactivity against cutting materials. In this study, I improve a coated tool to extend the tool life by producing nano-structure on its face by femto-second laser irradiations and investigate cutting properties of the improved tools such as tool wear and cutting temperature in titanium alloys milling. The cutting temperature is measured using two-color pyrometer with optical fiber. As a result, the nano-structure decrease the tool wear, but increase the cutting temperature.

Keywords : Nano-structure, Femto-second laser, Tool wear, End mill

1. 緒 言

チタンは熱伝導率が低く、また工具材質との親和性が高いために、極めて切削加工が難しい材料である。ハードミリングの場合、切削工具へ極めて高い機械的・熱的負荷が加わることから、工具の耐摩耗性・耐熱性を高めること、あるいは高負荷にならないように低摩擦・高潤滑化が必要とされる。これらの要求に応えるため、工具へのコーティング加工や工具すくい面の平滑化等の表面処理技術の研究がなされてきた。このような表面処理技術の一つとして、超短パルスレーザを用いて、硬質膜表面に微細なテクスチャを作製することで、摩擦係数が減少するなどの機能を持つ機能性表面を創成できることが知られている¹⁾。

本論文は、スローアウェイ型エンドミル用のコーテッド工具のすくい面にフェムト秒レーザを用いてナノオーダーの三次元構造（以下、ナノ構造）を形成した工具を作製し、切削実験に供し、工具摩耗特性の評価と光ファイバ型2色温度計を用いた切削温度測定から、ナノ構造付与工具の切削特性の調査を目的とする。

2. ナノ構造付与工具の作製

2.1 フェムト秒レーザ加工システム

切削工具へのナノ構造付与に用いた加工システムの外観写真と概略図をそれぞれ Fig.1, Fig.2 に示す。本加工システムは、フェムト秒レーザ加工機（サイバーレーザ社製 IFRIT）、ミラー、凹面鏡、XYZ 軸ステージ（IKO 社製 LT150CGF-400/5D）から構成される。レーザ加工機の主な諸元は中心波長 800nm、パルス幅 180fs、最大繰

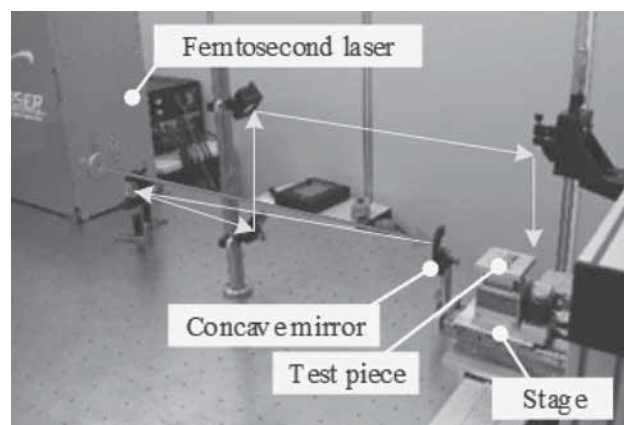


Fig.1 Photograph of femtosecond laser system.

*福井工業高等専門学校 機械工学科

**福井大学 先端科学技術育成センター

り返し周波数 1 kHz である。またレーザ光は直線偏光されている。本加工機では、パルスエネルギー、繰り返し周波数が可変である。レーザ加工機から出射されたレーザ光を、凹面鏡を用いて出射元ビーム径 6 mm を凹面鏡により 600 μ m まで集光する。なお凹面鏡は焦点距離 $F = 2000$ mm である。凹面鏡によって集光されたレーザ光は、XYZ 軸ステージ上で焦点となるように、ミラーによって光路長が調整されている。

2.2 工具へのナノ構造付与

ナノ構造を付与する切削工具は、スローアウェイ型エンドミル用のコーテッド超硬工具チップ（住友電工ハードメタル，ACX300 AXMT 123508 PEER-H）である。これは超硬合金を母材として，TiN，AlCrN を約 5 nm 毎に交互に多層コーティングされたものである。チップを，フェムト秒レーザ加工システムの XYZ 軸ステージ上に固定し，ステージ移動によって工具すくい面にレーザ走査して，チップ表面にナノ構造を付与した。Fig.3 にレーザ加工後の工具外観写真およびレーザ加工前後の工具すくい面の SEM 写真を示す。Fig.3 (b) 左に示した外観写真において点線で囲んだ部分がレーザ加工部である。未加工部

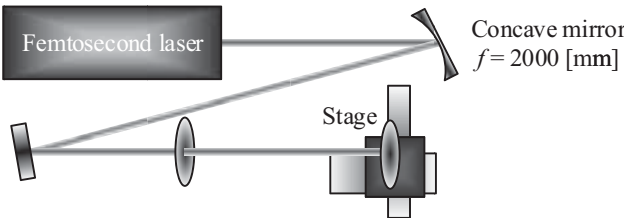


Fig.2 Schematic showing the top view of fs laser system

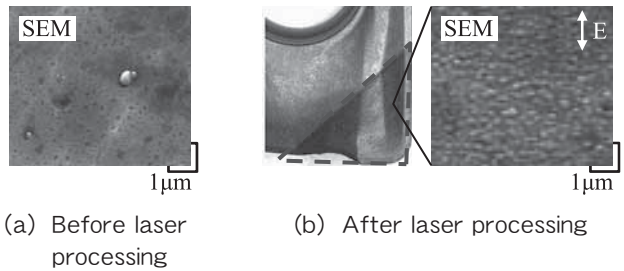


Fig.3 Photograph and SEM images of tool surface

と比較して黒く変色している。レーザ加工前後の SEM 写真からは，レーザ加工前 (Fig.3 (a)) では滑らかな面が，加工後 (Fig.3 (b)) ではナノオーダの構造が形成されていることがわかる。構造は，図中の E で示したレーザ光の偏光方向に対して直角方向に長い形状をしている。なお本論文では，工具へのナノ構造付与はレーザフルエンス $F = 0.168$ J/cm²で行っている。ここで，レーザフルエンスはパルスエネルギーを照射面積で除した値である。

3. 実験装置及び方法

3.1 切削実験装置及び方法

実験装置の概略図を Fig.4 に示す。立型マシニングセンタ（森精機製作所 (株) 製 NV-4000）を用いてスローアウェイ型エンドミルによる側面加工を行う。Table 1 に実験条件を示す。被削材は，代表的なチタン合金の Ti-6Al-4V である。なお，本実験で用いるスローアウェイ型エンドミルは 4 枚刃であるが，それぞれ工具チップの取り付け誤差を防ぎ，切り込みを一定とするために，1 枚刃により実験を行った。

工具摩耗実験では，ナノ構造を付与したレーザ加工済み

Table 1 Experimental conditions

Cutting Tool	Throw-away type end mill Diameter $D = 25$ mm
Work piece	Titanium-alloy (Ti-6Al-4V)
Cutting speed	$v = 300, 600, 900$ m/min
Feed per tooth	$f = 0.1$ mm/tooth
Radial depth of cut	$R_d = 0.5$ mm
Axial depth of cut	$A_d = 5$ mm
Cutting style	Down cut
Lubricant	Oil, Oil mist

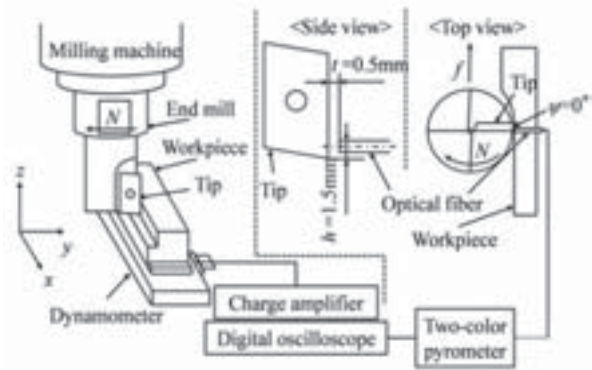


Fig.4 Fundamental structure of InAs/InSb two-color pyrometer

工具とナノ構造の無い未加工工具を切削速度 $v = 600 \text{ m/min}$ で湿式加工に供した。工具摩耗を評価するために、各切削距離において工具摩耗の影響が表れやすいチップ側刃逃げ面の摩耗幅 VBs (Fig.5) を測定した。図中の矢印はチップの観察方向を示している。ここでは切削距離として、工具と被削材が接触する距離の積算である実切削距離を用いる。チップの観察にはデジタルマイクロスコープ (KEYENCE 社製 VHX-900) を使用する。

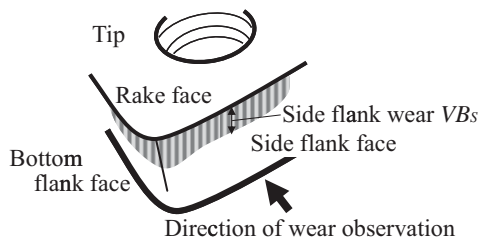


Fig.5 Observation of side flank wear

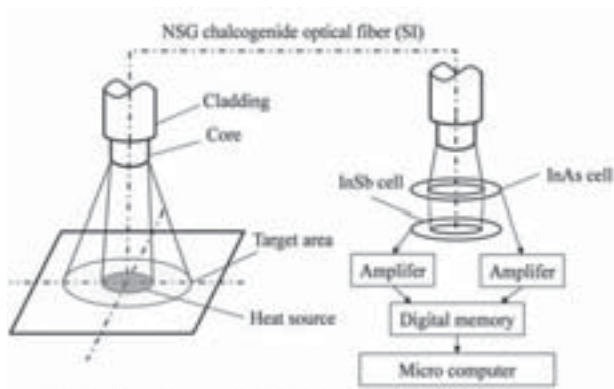


Fig.6 Fundamental structure of InAs/InSb two-color pyrometer

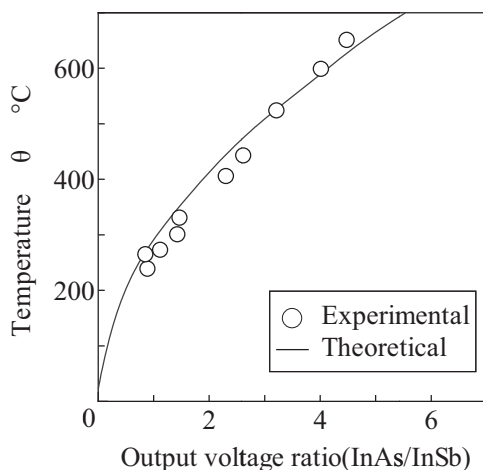


Fig.7 Calibration curve of two-color pyrometer

切削温度測定実験では、工具摩耗実験と同様の方法で側面加工を行い、光ファイバ型2色温度計を用いて工具逃げ面温度を測定する。ただし、ここでは温度測定を行うために潤滑方法を湿式からミスト供給へ変更した。Fig.4に示すように工作物に開けた貫通穴に光ファイバを挿入し、回転するエンドミルがこの貫通穴上部を通過する際に、チップ逃げ面から輻射される赤外線を検出して温度を求める。本方法により、切削途中の工具逃げ面温度の測定が可能となる。

3.2 光ファイバ型2色温度計

光ファイバ型2色温度計は、光ファイバと赤外線検出素子を組み合わせた放射温度計の一種である。微小領域の温度を非接触でかつ、速い応答速度で測定できるという特徴を有しており、エンドミル加工時の切削温度のような刃先の狭い領域において、急激に変化する現象の測定に適している。赤外線検出素子は、工具逃げ面の温度を $200 \sim 800^\circ\text{C}$ 程度と仮定して、この温度領域の測定に適した分光感度を有する InAs と InSb の2種類の赤外線検出素子が層状になった素子を用いた。Fig.6に光ファイバ型2色温度計の基本構成を示す。測定対象面から輻射された赤外線は、NSG カルコゲナイドガラスファイバによって赤外線検出素子へと伝送され、素子によって電気信号へ変換される。InAs, InSb それぞれからの出力の比 InAs/InSb を求め Fig.7 の校正曲線より温度へ換算する。このように2種類の素子の出力比を用いることで、測定物表面状態に依存する輻射率の影響を打ち消し、精度の良い測定が可能となっている。

4. 実験結果

4.1 工具摩耗実験

Fig.8 に、各切削距離 L_c におけるナノ構造を付与したレーザ加工済み工具とレーザ未加工工具の側刃逃げ面の観察写真を示す。切削距離が伸びるに従って、逃げ面摩耗が生じて、刃先の稜線付近に明るく写っている摩耗痕の幅が大きくなっていることがわかる。この摩耗痕の幅を10点測定し、平均したものを側刃逃げ面摩耗幅 VBs とした。切削距離 L_c と側刃逃げ面摩耗幅 VBs の関係を Fig.9 に示

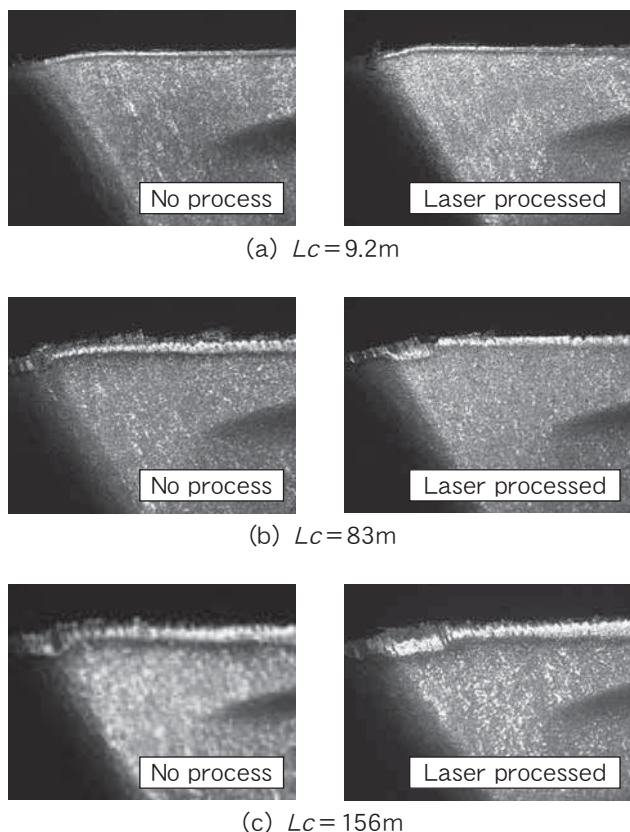


Fig.8 Photographs of side flank face at each cutting length

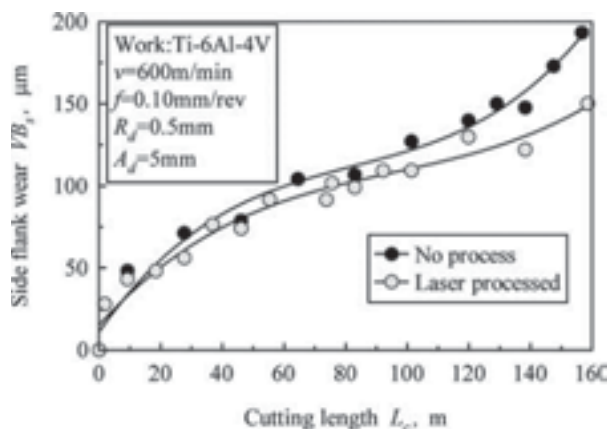


Fig.9 Relationship between cutting length and side flank wear

す。レーザ加工済み工具、未加工工具ともに $L_c = 40\text{m}$ 程度までに初期摩耗が進み、その後は緩やかに摩耗が進行するが、 $L_c = 100\text{m}$ 付近から未加工工具の摩耗幅が大きくなり、レーザ加工済み工具との差が広がった。本実験を終了した $L_c = 156\text{m}$ では、レーザ加工済み工具の摩耗幅は未加工工具に比べて約 25% 低減した。

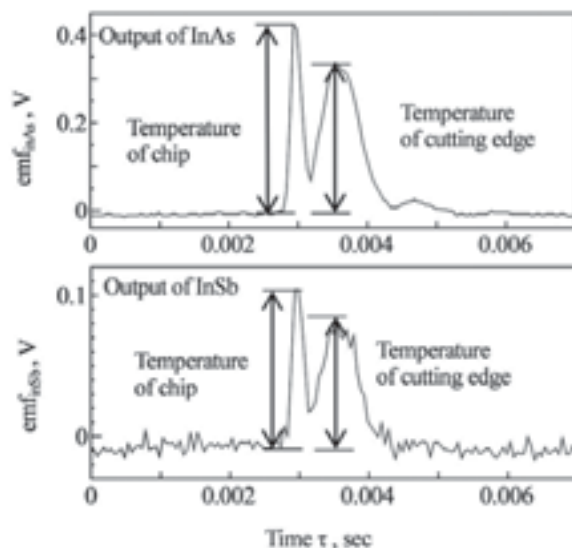


Fig.10 Typical waveform of two-color pyrometer

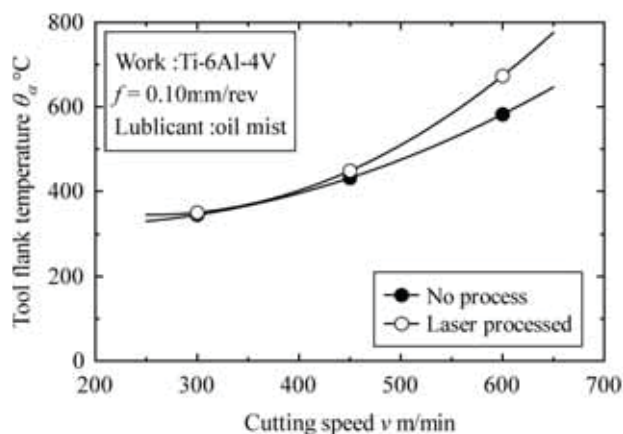


Fig.11 Relationship between cutting speed and tool flank temperature

4.2 切削温度測定実験

Fig.10 に切削速度 $v = 600\text{m/min}$ での切削時の 2 色温度計からの出力波形を示す。波形は、工具が一回転するごとに得られており、工具が光ファイバ全面を通過するときに工具逃げ面から輻射された赤外線を受光したものと考えられる。各波形には 2 つのピークがあるが、前方のピークがより大きく、高温となっていることを表している。一般的に、切削熱の分配率は工具よりも切りくずの方が大きく、また切りくずは工具に比べ体積が小さいため、高温になりやすい。このことから前方のピークは、工作物の切りくずによるものであり、後方のピークが測定対象とする工具逃げ面によるものであると考えられる。本実験では、波

形を10点測定し、平均したものを工具逃げ面温度 θ_α とした。

Fig.11 に、切削速度 $v = 300\text{m/min}$, 450m/min , 600m/min の場合の工具逃げ面温度 θ_α と切削速度 v の関係を示す。未加工工具とレーザ加工済み工具のいずれも $v = 300\text{m/min}$ では約 $\theta_\alpha = 350^\circ\text{C}$ であったものが、 $v = 600\text{m/min}$ では未加工工具で、 $\theta_\alpha = 582^\circ\text{C}$ 、レーザ加工済み工具では、 $\theta_\alpha = 673^\circ\text{C}$ となり、 v が大きくなると θ_α は2次関数的に上昇している。しかし、摩耗低減効果が確認された $v = 600\text{m/min}$ では、レーザ加工済み工具の方が高い θ_α となっていることがわかった。

このような結果となった原因として、ナノ構造付与により工具への被削材の凝着が抑制され、凝着摩耗が工具摩耗の主因となるチタン合金の切削においては工具摩耗が抑制されたが、凝着物がないために工具空転時の冷却効果が小さくなり、切削温度が高くなった可能性が考えられる。

5. 結言

フェムト秒レーザによってすくい面にナノ構造を付与したエンドミルを用いてチタン合金の側面加工を行い、工具摩耗、切削温度を調べた。得られた結果を以下に示す。

- (1) 側刃逃げ面摩耗は、ナノ構造を付与することによって低減した。
- (2) ナノ構造付与した場合の切削時の側刃逃げ面温度は $v = 300, 450\text{m/min}$ では、構造なし工具とほぼ同様であったが、 $v = 600\text{m/min}$ では高くなった。

参考文献

- 1) N. Yasumaru et al., 'Control of tribological properties of diamond-like carbon films with femtosecond-laser-induced nanostructuring', Appl. Surface Science, 254 (2008)